# 不同土壤硒水平对白术幼苗生长及部分生理特性的影响

张美德[1]，吴海棠[1]，张雅娟[2]，李大荣[1]，熊琳珂[1]，段媛媛[1]，周武先[1*]

（1. 湖北省农业科学院中药材研究所，恩施 445000; 2. 恩施土家族苗族自治州农业农村局，恩施 445000）

**摘要：**硒(Se)为植物非必需营养元素，但适量的硒对植物生长发育具有促进作用，因此研究植物生长对硒的响应及其生理机制具有重要意义。本研究采用盆栽试验，设置 6 种不同的土壤硒处理（0、5、10、25、50、100 mg kg$^{-1}$），观察不同硒处理对白术幼苗生理生长的影响及其综合效应。结果表明：相比于对照处理，5 mg kg$^{-1}$ 的硒处理可以提高白术幼苗鲜重、叶片叶绿素相对含量(SPAD)以及可溶性糖(SS)含量，增幅分别为 8.8%、8.4%和 60.3%；显著降低白术幼苗叶片的过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性；同时减少叶片可溶性蛋白含量(SP)和丙二醛(MDA)含量，降幅分别为 32.1%和 18.9%。25 mg kg$^{-1}$ 以上硒处理则不利于白术幼苗的生长，会导致 MDA 和超氧阴离子自由基($O_2^-$)含量显著上升，使白术幼苗的抗氧化系统遭受胁迫。主成分分析表明，鲜重、株高、SP、CAT 和 POD 等可作为反映白术幼苗生理生长的重要特征指标。综上表明，土施适量硒可以显著促进白术幼苗的生理生长，并以 5 mg kg$^{-1}$ 的硒处理效果最佳，可用于白术幼苗的高效优质繁育和工业化生产。

**关键词：**硒，白术，生长，光合特性，抗氧化系统

**中图分类号：**Q945　　　　**文献标识码：**A

# Effects of different soil selenium levels on growth and partial physiological characteristics of *Atractylodes macrocephala* seedlings

ZHANG Meide[1], WU Haitang[1], ZHANG Yajuan[2], LI Darong[1], XIONG Linke[1], DUAN Yuanyuan[1], ZHOU Wuxian[1*]

(1. *Institute of Chinese Herbal Medicines, Hubei Academy of Agricultural Sciences*, Enshi 445000, Hubei, China;

2. Enshi *Tujia and Miao Autonomous Prefecture of Agriculture and Rural Bureau*, Enshi 445000, Hubei, China)

**Abstract:** Although Se has not been considered an essential element for higher plants, numerous studies have shown that selenium (Se) plays an important role in promoting plant growth. Therefore, it is of great significance to learn the effects of different soil Se levels on the growth of *Atractylodes macrocephala* and physiological mechanism underlying plant response to exogenous selenium. In this study, a pot experiment was conducted to explore the comprehensive effects of different Se treatments (0, 5, 10, 25, 50, 100 milligram Se per kilogram air-dry soil) on growth of

---

**基金项目：**湖北省重点研发计划项目(2020BCA059)；湖北省农业科技创新中心重大科技研发项目(2020-620-000-002-04)；恩施州科技计划项目(D20200017)[Supported by Hubei Key Research and Development Program (2020BCA059); Hubei Technology Innovation Center for Agricultural Sciences-Key Research and Development Project of Science and Technology (2020-620-000-002-04); Science and Technology Plan of Enshi Autonomous Prefecture (D20200017)]。

**作者简介：**张美德（1978-），博士，副研究员，主要从事药用植物资源利用研究，(E-mail) emailtoecho@163.com。

***通讯作者：**周武先，硕士，助理研究员，主要从事药用植物生理生态研究，(E-mail) zhou_wx222@163.com。

*A. macrocephala* seedlings. The results were as follows: 5 mg·kg$^{-1}$ Se treatment increased the fresh weight, leaf SPAD (soil and plant analyzer development) value and leaf soluble sugar (SS) content of *A. macrocephala* seedlings by 8.8%, 8.4% and 60.3%, respectively; While decreased the leaf soluble protein (SP) and malondialdehyde (MDA) content by 32.1% and 18.9% respectively, as well as depressed the activities of peroxidase (POD) and catalase(CAT), compared with the control. Treatments of Se >25 mg·kg$^{-1}$ were not beneficial to the growth of *A. macrocephala* seedlings, resulting in a significant increase in MDA and superoxide anion radical ( $O_2^-$) content, which destroyed the antioxidant system. Principal component analysis showed that fresh weight, plant height, leaf SP content and activities of CAT and POD could be used as characteristic indexes to reflect the growth status of *A. macrocephala* seedlings. In conclusion, the appropriate soil Se levels could significantly promote the growth of *A. macrocephala* seedlings, and 5 mg·kg$^{-1}$ soil Se level was the optimum. Application of appropriate Se to the soil could be beneficial for efficient breeding and industrial production of *A. macrocephala*.

**Key words:** selenium, *Atractylodes macrocephala*, growth, photosynthetic characteristics, antioxidant system



硒(Selenium)是植物非必需营养元素，其对植物的生长具有促进或抑制作用，这种促进或抑制作用主要取决于植物体内硒元素浓度的大小。一般而言，低浓度的硒有利于植物的生长，过量的硒则会抑制植物的生长并产生毒害作用(金小琬等，2019)。适量硒可以提高植物的光合作用，主要通过促进植物叶绿素的合成，增加叶绿素的积累来实现(李秀启等，2019)。此外，硒元素还享有活性氧"清道夫"的美誉，能直接或间接参与植物体内过量活性氧的清除，其在生物体内的酶促和非酶促防御系统中均起着极为关键的抗氧化作用，从而可以提高植物对逆境的抵抗能力(Williams et al., 2009)。胡旭雅等(2019)的研究表明低浓度硒可促进薄壳山核桃幼苗生长，而高浓度硒则产生严重的抑制作用，且硒浓度越高，抑制作用越明显。周武先等（2020a）的研究表明适宜浓度的外源硒可以强化白术对钾的吸收从而促进白术的生长。王丹丹等(2021)的研究表明，适量的硒可以促进茶树的生长，提高茶叶的品质，提高茶叶茶多酚含量。Zhu et al.(2017)的研究表明，适量硒能提高轮叶党参的营养品质，增加其蛋白质、微量元素和大多数氨基酸的含量，从而提高了轮叶党参的品质和经济效益。

白术（*Atractylodes macrocephala* Koidz.）为菊科苍术属多年生草本植物，是一种常用大宗中药材，以根茎入药，具补脾健胃、燥湿利水、止汗安胎等功能(药典一部，2020)，其主要药效成分苍术酮、苍术醇和白术内酯等具有抗氧化(Li et al., 2012)、去炎症(Li et al., 2007)、抗突变(Huang et al., 2006)和抗肿瘤(Wen et al., 2010)等作用。在我国，白术年用量达数万吨，同时也是重要的出口中药材，具有广阔的种植前景，因此研究硒对白术生长的影响具有重要意义。王华等(2019)的研究表明适量浓度的硒溶液浸种可以促进白术种子萌发，且叶面喷施适量硒肥可以促进白术幼苗的生长。黄思勇等(2020)的研究表明叶面喷施适量的硒肥可以显著提高白术的产量，并增加其根际土壤部分养分含量。Zhou et al.(2021)的研究表明叶面喷施适量硒肥可以显著提高白术的存活率和产量，并改善其根际土壤微生态环境。以往的研究主要集中于叶面喷施硒肥对白术生长的影响，而土施硒肥对白术产量及生理特性的影响的研究仍未见报道。因此，本研究通过设置不同浓度的土壤硒处理，探索不同土壤硒水平对白术幼苗生长发育的影响，为白术幼苗高效优质繁育提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

白术种子于 2019 年 11 月采集于湖北省咸丰县小村乡李子溪村(108°54′51″ E, 29°53′5″ N，海拔 832 m)。外源硒为亚硒酸钠($Na_2SeO_3$，分析纯)，购自山东西亚化学股份有限公司。选

用壤土和椰糠作为白术育苗的基质原材料，壤土和椰糠的基本性质见表 1。试验所用育苗盘及 32 孔穴盘内径分别为 52 cm×26 cm×8 cm 和 50 cm×25 cm×6 cm。

表 1 壤土和椰糠的基本性质

Table1 Basic chemical properties of the loam and coconut coir

| 栽培基质 Cultivation substrate | pH | 全碳 TC (%) | 有机质 OM ($g\ kg^{-1}$) | 全氮 TN ($g\ kg^{-1}$) | 全磷 TP ($g\ kg^{-1}$) | 全钾 TK ($g\ kg^{-1}$) | 碱解氮 AN ($mg\ kg^{-1}$) | 速效磷 AP ($mg\ kg^{-1}$) | 速效钾 AK ($mg\ kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 壤土 Loam | 6.71 | — | 45.43 | 2.64 | 0.49 | 14.44 | 102.8 | 7.06 | 29.0 |
| 椰糠 Coconut coir | 5.10 | 41.55 | — | 9.63 | 0.39 | 1.42 | 102.4 | 79.84 | 4553.5 |

注: **TC**. 全碳; **OM**. 有机质; **TN**. 全氮; **TP**. 全磷; **TK**. 全钾; **AN**. 碱解氮; **AP**. 速效磷; **AK**. 速效钾;

Note: **TC**. Total carbon; **OM**. Organic matter; **TN**. Total nitrogen; **TP**. Total phosphorus; **TK**. Total potassium; **AN**. Alkali-hydrolyzale nitrogen; **AP**. Available phosphorus; **AK**. Available potassium.

### 1.2 试验设计

试验于 2020 年 9 月在湖北省农业科学院中药材研究所温室大棚中进行。将壤土和椰糠按体积比 1:1 进行混合作为白术的育苗基质。白术播种前种子用清水浸泡 2 h，之后 75%酒精进行消毒处理 1 min，蒸馏水润洗干净后用 3%次氯酸钠浸泡消毒 10 min 并漂洗干净，最后用蒸馏水润洗 3~4 次，晾干备用。分别设置 6 种不同的土壤硒处理：0、5、10、25、50、100 mg $kg^{-1}$，首先将硒溶解到水里面，再将水加进土壤里搅拌均匀，对照使用等体积蒸馏水代替硒溶液，每个处理 4 次重复。将消毒好的种子均匀撒播于育苗盘中，每天根据育苗基质水分情况适量补水，保持基质湿润直到出苗。将长出两片真叶的白术幼苗移栽至装有不同硒浓度穴盘中，移栽后定期浇灌 1/4 Hoagland’s 营养液，并根据白术生长情况进行日常补水管理。分别在移栽 0、7、14、21 和 28 d 时测定幼苗形态指标，最后一次测定完成后进行破坏性取样，称量地上部和地下部鲜重，并剪取叶片装入取样袋中用于测定各项生理指标。

### 1.3 指标测定及方法

幼苗生长指标的测定：移栽后每 7 d 用直尺测量每个处理白术幼苗的叶长、叶宽和株高（茎基部到茎尖的长度），并用便携式手持叶绿素仪(TYS-A, 浙江托普云农科技股份有限公司)测量叶片叶绿素相对含量（SPAD）。培养结束后将白术幼苗拔出，用蒸馏水冲洗干净，吸水纸吸干表面水分，从茎基部剪断，将白术幼苗分为地上和地下部分，采用千分之一电子天平称量白术幼苗各部分鲜重，总鲜重=地上鲜重+地下鲜重。

抗氧化系统相关指标的测定参照施海涛(2016)的《植物逆境生理学实验指导》进行。过氧化氢酶（CAT）活性采用紫外吸收法测定，以在规定条件下每 min 内引起 $D_{240}$ 减少 0.1 的酶量为 1 个 CAT 活性单位；采用 Sigma 法测定过氧化物酶（POD），以在规定条件下每 min 内引起 $D_{240}$ 增加 0.1 的酶量为 1 个 POD 活性单位；采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）；采用 G-250 考马斯亮蓝法可溶性蛋白（SP）；采用蒽酮法测定可溶性糖（SS）；超氧阴离子自由基( $O_2^-$)的测定采用硝基四氮唑蓝还原法(任迎虹等, 2017)。

### 1.4 数据处理

参照周武先等(2019)的方法计算白术幼苗对不同硒处理的生理生长响应指数(PGRI)以及不同硒处理对白术幼苗生理生长的综合效应(CE)。

试验数据采用 Excel 2016 进行处理；使用 SPSS 20.0 进行统计和分析，One way ANOVA 进行方差分析，Ducan 法(α=0.05)进行多重比较，Pearson 法进行相关性分析；使用 Origin 8.5 制图；图表中数据均使用平均值±标准偏差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同硒处理对白术幼苗形态特征及叶片 SPAD 值的影响

从图 1 可以看出，硒对白术幼苗的生长影响较大，呈现低浓度促进，高浓度抑制的现象，硒处理浓度为 5 mg·kg$^{-1}$ 时白术幼苗的株高和根长均最大(图 1)。从图 2 可以看出，不同硒处理浓度处理下白术幼苗叶长、叶宽、株高和 SPAD 值均随时间变化呈不断上升的趋势。结束培养后，不同浓度硒处理对幼苗叶片的生长有一定的影响，结束培养后硒处理浓度为 5 mg·kg$^{-1}$ 时，幼苗的叶长和叶宽最大，与对照相比增幅分别达到了 4.3%和 9.1%，当硒处理浓度超过 25 mg·kg$^{-1}$ 时，白术幼苗叶长和叶宽显著低于对照，硒处理浓度达到 100 mg·kg$^{-1}$ 时叶长和叶宽最小，降幅分别为 15.3%和 21.2%。硒处理浓度为 5 mg·kg$^{-1}$ 时，幼苗的株高最高，与对照相比差异性显著，增幅达到了 7.7%。当硒处理浓度超过 25 mg·kg$^{-1}$ 时，白术幼苗的株高呈现下降趋势，在硒浓度达到 100 mg·kg$^{-1}$ 时降幅最大，为 18.8%。SPAD 值的变化趋势与株高类似，当硒处理浓度为 5 mg·kg$^{-1}$ 时 SPAD 值最高，与对照相比增幅达到了 8.4%，当硒处理浓度超过 25 mg·kg$^{-1}$ 时，SPAD 值呈现下降趋势，在硒浓度为 100 mg·kg$^{-1}$ 时 SPAD 值最低，与对照相比降幅为 13.6%。




图 1 不同硒处理对白术幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of different Se treatments on the growth of *Atractylodes macrocephala* seedlings

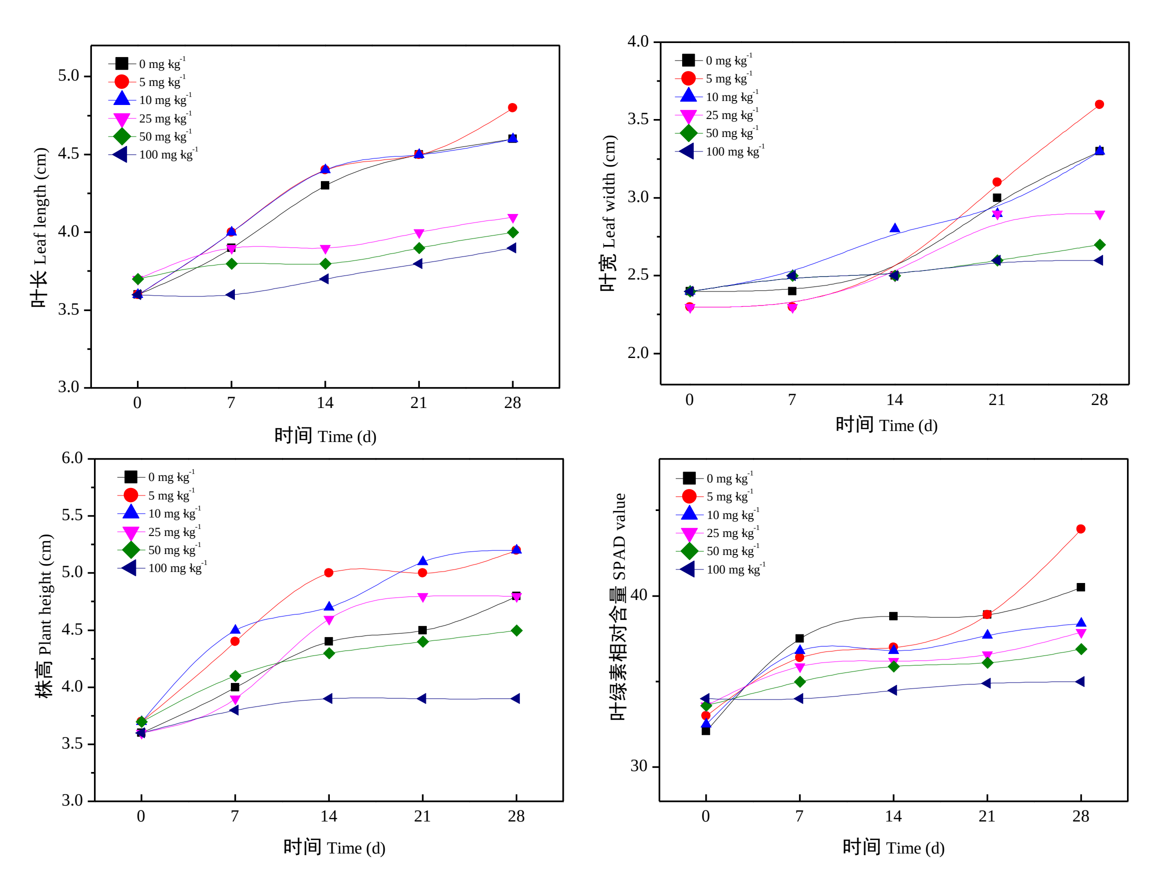
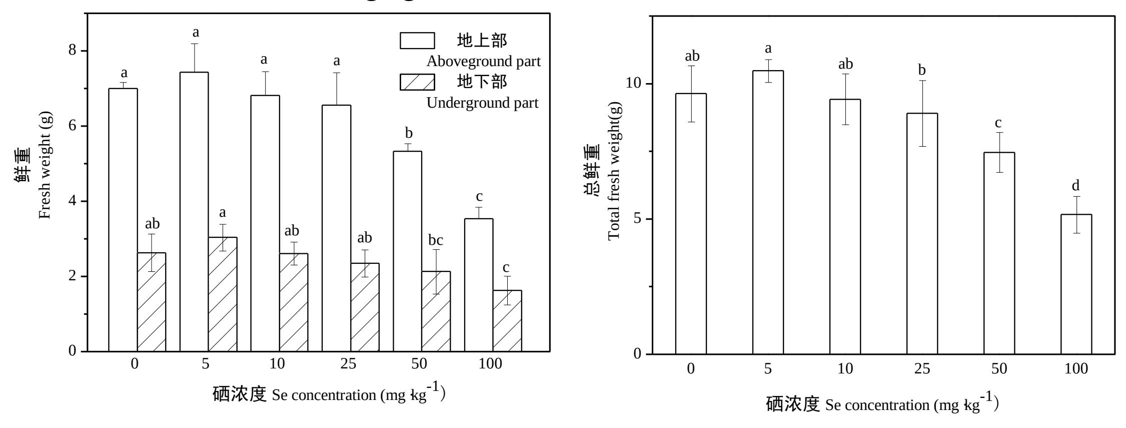



图 2 不同硒处理下白术幼苗形态和叶绿素随时间的变化

Fig. 2 Morphological character and leaf SPAD value of *Atractylodes macrocephala* seedlings in different growth stages under different Se treatments

## 2.2 不同硒处理对白术幼苗生物量的影响

从图 3 可以看出，不同硒浓度处理下，白术幼苗鲜重基本呈现先上升后下降的趋势。5 mg $kg^{-1}$ 处理总鲜重与 0、10 mg $kg^{-1}$ 处理相比无显著差异，但显著高于其他各处理(表 2)。地上部鲜重 5、10 和 25 mg $kg^{-1}$ 硒处理与对照相比无显著性差异，50、100 mg $kg^{-1}$ 地上部鲜重显著低于对照，与对照相比降幅分别为 24.3%和 50.0%。5 mg $kg^{-1}$ 硒处理的白术幼苗地下部鲜重高于对照处理，增幅为 15.4%，50、100 mg $kg^{-1}$ 两个硒处理显著低于对照，降幅分别为 19.2%和 38.5%。10、25 mg $kg^{-1}$ 两个硒处理地下部鲜重与对照相比无显著性差异。




不同小写字母表示处理间差异显著($P$<0.05)，下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments($P$<0.05), the same below.

图 3 不同硒处理对白术幼苗鲜重的影响

Fig. 3 Effects of different Se treatments on fresh weight of *Atractylodes macrocephala* seedlings

## 2.3 不同硒处理对白术幼苗抗氧化系统的影响

从图 4 可以看出，不同硒处理中，以 5 mg kg$^{-1}$ 硒处理的白术幼苗叶片 CAT 活性最低，100 mg kg$^{-1}$ 硒处理最高，且与对照处理相比均达到显著性差异。10、25 和 50 mg kg$^{-1}$ 硒处理与对照相比无显著差异。5 mg kg$^{-1}$ 硒处理的白术幼苗叶片 POD 活性显著低于对照处理，100 mg kg$^{-1}$ 硒处理的白术幼苗叶片 POD 活性显著高于对照处理，其余硒处理与对照相比无显著差异。总体来看，不同浓度硒处理的白术幼苗 CAT 与 POD 活性变化趋势基本相同。白术幼苗叶片中的 $O_2^-$含量随着硒浓度的增加基本呈现逐渐上升的趋势，其中 5、10 和 25 mg kg$^{-1}$硒处理的白术幼苗叶片中 $O_2^-$含量与对照处理相比没有显著性差异，50 和 100 mg kg$^{-1}$ 处理叶片中的 $O_2^-$含量显著高于对照处理。

随着硒处理浓度的升高，白术幼苗叶片中 SS 含量呈现先增加后减少的趋势，当硒浓度达到 10 mg kg$^{-1}$时，白术幼苗叶片 SS 含量最高，达到了 29.9 mg g$^{-1}$，相比于对照增幅达 72.0%。随着硒处理浓度的增加，白术幼苗叶片中 SP 含量呈现先减少后增加的趋势，在硒处理浓度为 100 mg kg$^{-1}$ 时白术幼苗叶片 SP 含量最高，达到了 14.2 mg g$^{-1}$，相比于对照增加了 73.7%，10、25 和 50 mg kg$^{-1}$ 硒处理的 SP 含量与对照处理相比无显著性差异。5 mg kg$^{-1}$ 硒处理的白术幼苗叶片 SP 含量呈显著下降趋势，含量为 5.57 mg g$^{-1}$，相比于对照降幅为 32.1%；不同浓度硒处理间白术幼苗叶片 MDA 含量无显著性差异(图 4)。

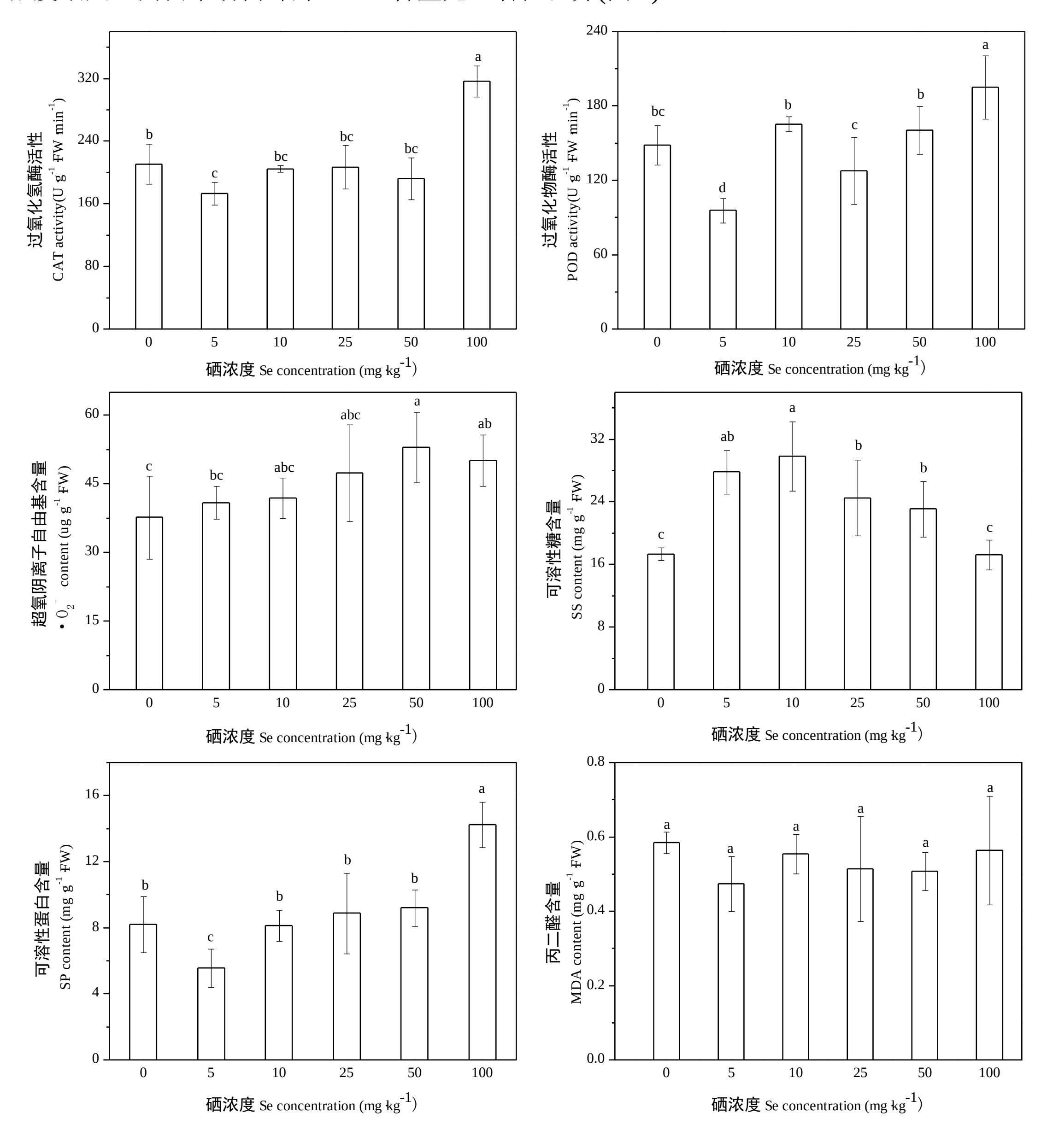


图 4 不同硒处理对白术幼苗抗氧化系统的影响

Fig. 4 Effects of different Se treatments on antioxidant system of *Atractylodes macrocephala* seedlings

**2.4 不同硒处理对白术幼苗生理生长的综合效应**

由于形态特征、光合特性和生物量是评价白术幼苗生长状况的主要因素，因此本研究选取叶长、叶宽、株高、SPAD 值以及鲜重作为评价外源硒对白术幼苗生长影响的考核指标。从表 2 可以看出，不同硒处理下白术幼苗生理生长响应指数存在差异；不同硒处理对白术幼苗生长的综合效应(CE)也存在显著差异。外源硒对白术幼苗生理生长的综合效应由大到小依次为 5 mg kg$^{-1}$ (0.336) > 10 mg kg$^{-1}$ (0.013) > 25 mg kg$^{-1}$ (-0.370) > 50 mg kg$^{-1}$ (-0.672) > 100 mg kg$^{-1}$ (-1.141)。随着硒处理浓度的升高，CE 值呈现先增加后下降的趋势，并以 5 mg kg$^{-1}$ 硒处理对白术幼苗生长的促生效果最佳；当硒处理浓度超过 25 mg kg$^{-1}$ 时，白术幼苗的生长受到严重抑制。

表 2 不同硒处理对白术幼苗生理生长的综合效应

Table 2 Comprehensive effects of different Se treatments on the physiological and morphological characteristics of *Atractylodes macrocephala* seedlings

| 硒浓度 Se concentration (mg kg$^{-1}$) | 生理生长响应指数 PGRI | | | | | 综合效应 CE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 叶长 Leaf length | 叶宽 Leaf width | 株高 Plant height | 叶绿素相对含量 SPAD value | 鲜重 Fresh weight | |
| 5 | 0.040 | 0.070 | 0.068 | 0.077 | 0.081 | 0.336 |
| 10 | 0.007 | 0.002 | 0.078 | -0.053 | -0.021 | 0.013 |
| 25 | -0.110 | -0.130 | 0.009 | -0.064 | -0.075 | -0.370 |
| 50 | -0.122 | -0.167 | -0.070 | -0.088 | -0.225 | -0.672 |
| 100 | -0.145 | -0.205 | -0.191 | -0.136 | -0.464 | -1.141 |

**2.5 白术幼苗生理生长指标的相关性分析和 PCA 分析**

如表 3 所示，SPAD 与 CAT 活性、POD 活性和 SP 含量呈现极显著负相关关系，与 $O_2^-$ 含量显著负相关；CAT 活性与 POD 活性和 SP 含量呈现极显著正相关关系，与 MDA 含量和 $O_2^-$含量显著正相关；POD 活性与 SP 含量及 MDA 含量呈现极显著正相关关系，与 $O_2^-$ 含量显著正相关；SP 含量与 MDA 含量呈现显著正相关关系，与 $O_2^-$含量极显著正相关。说明白术幼苗的光合代谢与抗氧化系统间存在密切联系。

从图 5 可以看出，第一排序轴解释了变量的 64.6%，第二排序轴解释了变量的 15.4%，前两个排序轴累计解释了变量的 80.0%。鲜重、株高、SAPD、SP、CAT 和 POD 等与第一排序轴显著相关，SS 和 $O_2^-$与第二排序轴显著相关。这表明鲜重、株高、SAPD、SP、CAT 和 POD 等可作为反映白术幼苗生理生长的重要特征指标。此外，不同硒处理投影到 PCA 二维平面的样点分散聚集，表明不同硒处理下白术幼苗的生理生长特性存在差异。

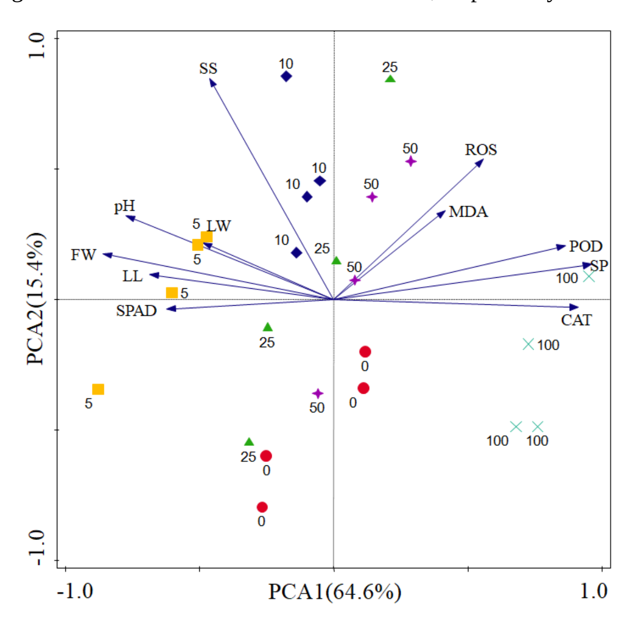
表 3 白术幼苗生理指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of physiological indexes of *Atractylodes macrocephala* seedlings

| 指标 Index | SPAD | CAT | POD | SS | SP | MDA | $O_2^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SPAD | 1 | | | | | | |
| CAT | －0.653** | 1 | | | | | |
| POD | －0.767** | 0.754** | 1 | | | | |
| SS | 0.343 | -0.394 | -0.225 | 1 | | | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SP | －0.780** | 0.901** | 0.832** | -0.357 | 1 | | |
| MDA | -0.18 | 0.413* | 0.592** | 0.1 | 0.455* | 1 | |
| $O_2^-$ | －0.489* | 0.446* | 0.439* | 0.119 | 0.594** | 0.167 | 1 |

注：*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。
Note: * and ** indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.




**LL**. 叶长; **LW**. 叶宽; **pH**. 株高; **SPAD**. 叶绿素相对含量; **FW**. 鲜重; **CAT**. 过氧化氢酶; **POD**. 过氧化物酶; **MDA**. 丙二醛; **SP**. 可溶性蛋白; **SS**. 可溶性糖; **ROS**. 超氧阴离子自由基。

**LL**. Leaf length; **LW**. Leaf width; **pH**. Plant height; **SPAD**. Soil and plant analyzer development; **FW**. Fresh weight; **CAT**. Catalase; **POD**. Peroxidase; **MDA**. Malondialdehyde; **SP**. Soluble protein; **SS**. Soluble sugar; **ROS**. Reactive oxygen species.

图 5 白术幼苗生长影响因素的 PCA 排序

Fig. 5 PCA ordination of factors affecting the growth of *Atractylodes macrocephala* seedlings

# 3 讨论

## 3.1 硒对白术幼苗生长和光合代谢的影响

众多的研究表明，硒对植物生长发育具有明显的剂量效应，呈现低浓度促进高浓度抑制的现象(Schiavon et al., 2017；Zhou et al., 2021)。本研究结果显示，低浓度的硒处理(5 mg $kg^{-1}$)对白术幼苗叶长、叶宽以及株高均具有显著的促进作用，并在一定程度上增加了白术幼苗的总生物量，而高浓度的硒处理(≥25 mg $kg^{-1}$)则会抑制白术幼苗生长甚至产生严重的毒害作用。这与外源硒对黄瓜（Hawrylak et al., 2015）、小麦（姜宗昊等，2021）以及川党参（周武先等，2020b）等作物生长影响的研究结果类似。说明硒浓度的把控对通过外源施硒促进作物生长的农业技术开发尤为重要。叶绿素是植物进行光合作用的重要物质，同时也是植物进行光合作用及能量转换的基础(金小琬等，2019)，其含量可作为反映植物营养状况和光合能力的重要生理指标（冷芬等，2020）。本研究发现，硒处理浓度为 5 mg $kg^{-1}$ 时白术幼苗叶片 SPAD 值最高，随着硒处理浓度的增加 SPAD 值逐渐下降，当硒处理浓度为 100 mg $kg^{-1}$ 时白术幼苗叶片的 SPAD 值最低，说明低浓度的硒处理(5 mg $kg^{-1}$)可以促进白术幼苗的光合作用，而高浓度的硒处理(≥25 mg $kg^{-1}$)则会对白术幼苗的光合代谢产生抑制作用。

## 3.2 硒对白术幼苗抗氧化系统的影响

CAT 和 POD 均为植物体内抗氧化酶系统的重要成员，可以有效抑制细胞膜脂质过氧化反应，帮助植物抵御逆境胁迫（杨舒贻等，2016）。CAT 主要存在于植物的叶绿体、线粒体和内质网中，是过氧化物酶体的标志酶，其作用是将过氧化氢还原成水：$2H_2O_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O$，清除体内的过氧化氢，避免细胞遭受 $H_2O_2$ 的毒害，是生物防御体系的关键酶之一。POD 广

泛存在于植物体中，是活性较高的一种蛋白酶，其与呼吸作用、光合作用以及生长素的氧化等都存在密切关系。MDA 是生物膜系统脂质过氧化产物之一，可以用来表征植物细胞膜系统的受损程度。 $O_2^-$是生物体内氧分子在参与酶促或非酶促反应时，接受一个电子后形成的氧自由基，它可以进一步衍生为其他更活泼的氧自由基并引发过氧化反应，对细胞膜和生物大分子产生破坏作用（施海涛，2016）。因此， $O_2^-$也是衡量植物在受到逆境胁迫时的重要生理指标。本研究结果显示，5 mg $kg^{-1}$ 硒处理的 CAT 和 POD 活性均显著低于对照，而 100 mg $kg^{-1}$ 硒处理的 CAT 和 POD 活性显著高于对照。这可能是由于低浓度硒处理的土壤环境相比于对照处理更加适宜白术幼苗的生长，没有产生逆境胁迫，因此抗氧化酶活性水平较低；而高浓度的硒处理形成了较强的逆境胁迫，产生较多的氧自由基，植物细胞启动保护机制，调节相关基因表达，激活了 CAT 和 POD 活性。随着硒处理浓度的增加，白术幼苗体内的 $O_2^-$呈现逐渐上升的趋势，硒浓度达到 100 mg $kg^{-1}$ 时 $O_2^-$显著高于对照处理，这与高浓度硒处理白术幼苗 CAT 和 POD 活性显著增加相符。不同硒处理下白术幼苗 MDA 含量没有显著变化，可能是因为 0~100 mg $kg^{-1}$ 的硒处理还未能使白术幼苗体内发生严重的脂质过氧化反应。

SP 和 SS 可作为植物细胞内的渗透调节物质，维持胞内水分平衡，在遭遇逆境胁迫时植物会通过在体内主动积累 SP 和 SS 等渗透调节物质从而维持正常的细胞渗透压，以增强对逆境胁迫的适应能力(刘彬等，2020)。王华等（2019）的研究表明，随着喷施硒肥浓度的增加，白术幼苗可溶性蛋白呈现先增加后下降的趋势。本研究结果与王华等（2019）的研究结果相反，推测可能与白术幼苗所遭受的逆境胁迫程度不同有关，本研究中高浓度的硒处理可能使白术幼苗产生一种适应机制，通过增加 SP 含量维持正常的细胞渗透压，从而降低其受到的伤害。本研究中 SS 的变化与 SP 基本呈现相反的变化趋势，这可能是由于白术幼苗体内 SP 和 SS 在一定条件下可以相互转化，为了维持正常的细胞渗透压而形成的一种保护机制，但具体的作用机理还有待进一步研究。

### 3.3 硒对白术幼苗生理生长的综合效应

植物的形态特征和生理指标可以反映植物的生长状况，也是植物响应外界环境变化的方式之一（(段媛媛等，2017；周武先等，2020a）。主成分分析法（PCA）是一种高效降维方法，通过 PCA 分析，可以筛选植物响应外界环境的主要生理生长指标，并针对性的进行分析，从而量化外界环境对植物生理生长的影响(段媛媛等，2017)。本研究对影响白术生理生长的因素进行了 PCA 分析，结果表明，白术的光合代谢和抗氧化系统间存在密切联系，两者相辅相成，相互影响，显著影响着白术幼苗的生长，其中鲜重、株高、SAPD、SP、CAT 和 POD 可作为反映白术幼苗生理生长状况的重要指标。本研究利用部分筛选出来的重要特征指标，计算出不同硒处理对白术生理生长影响的综合效应指数（CE），量化了外源硒对白术幼苗生长的影响。研究结果显示，5 mg $kg^{-1}$ 硒处理对白术幼苗的生长具有显著的促进作用，而硒浓度超过 25 mg $kg^{-1}$ 时对白术的生理生长则会产生一定的抑制作用，随着硒浓度的提高，抑制作用则更加明显。这可能与过量施硒使白术幼苗遭受逆境胁迫进而抑制了白术的生长有关。

## 4 结论

土施 5 mg $kg^{-1}$ 硒肥可以提升白术幼苗叶片 SPAD 值，对其生长有一定促进作用，过量施硒肥（≥25 mg $kg^{-1}$）则会使白术幼苗的光合代谢和抗氧化系统遭受胁迫，严重抑制白术幼苗的生理生长。因此，在白术育苗过程中，通过在土壤基质中添加硒肥可以达到高效优质繁育的目的，但硒肥的施用量要控制在合理范围。

**参考文献：**

DUAN YY, SONG LJ, NIU SQ, et al., 2017. Differences in leaf functional traits of *Robinia pseudoacacia* at different ages and their relationship with soil nutrients [J]. J Appl Ecol, 28(1)：28-36. [段媛媛，宋丽娟，牛素旗，等，2017. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 28(1): 28-36.]

CHINESE PHARMACOPOEIA COMMITTEE, 2020. Pharmacopoeia of the people’s Republic of China[S]. Part 1. China Medical Science and Technology Press: 103-104. [国家药典委员会,

2020. 中华人民共和国药典[S]. 一部. 中国医药科技出版社：103-104.]
HAWRYLAK N B, MATRASZEK R, POGORZELEC M, 2015. The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants[J]. Acta Physiol Plant, 37(2): 41.
HUANG SY, ZHOU GL, KANG ZX, et al., 2020. Effects of exogenous selenium on growth and rhizosphere soil physical and chemical properties of *Atractylodes macrocephala* Koidz[J/OL]. Tradit Chin Med, 2020(9): 2085-2090. https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2020.09.001. [黄思勇, 周光龙, 康振兴, 等, 2020. 外源硒对咸丰白术生长及其根际土壤理化性质的影响[J/OL].中药材, 2020(9): 2085-2090. https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2020.09.001.]
HUANG QS, HONTG ZL, ZHANG YL, et al., 2006. The research on the effect of abstraction of *Atractylodes* on the ability of resisting mutation of human peripheral blood lymphocytes for Cr~(6+)[J]. Prog Mod Biomed, 2006.
HU XY, LI CY, NI ZT, et al., 2019. Effects of selenium treatment on the growth of *Carya illinoensis* seedlings [J]. J Nucl Agric, 33(8): 1639-1646. [胡旭雅, 李财运, 倪钟涛, 等, 2019. 硒处理对薄壳山核桃幼苗生长的影响[J]. 核农学报, 33(8): 1639-1646.]
JIANG ZH , LIU YX, ZHANG ZM et al., 2021. Effects of different selenium contents in soil on main traits related to yield of wheat and selenium absorption[J]. Acta Agric Boreal-Occident Sin, (1): 1-9. [姜宗昊, 刘玉秀, 张正茂, 等, 2021. 土壤不同硒含量对小麦主要产量相关性状和硒吸收利用的影响[J]. 西北农业学报, (1): 1-9.]
JIN XW, ZHU X, HUANG J, et al., 2019. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. Mol Plant Breed, 17(1)：288-294. [金小琬, 朱茜, 黄进, 等, 2019. 硒对叶绿体及光合作用的影响[J]. 分子植物育种, 17(1): 288-294.]
LENG F, YANG ZJ, WU YC, et al., 2020. Effects of soil pH value on physiology, photosynthetic characteristics and active component content of *Polygonum multiflorum* Thunb[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 40(9): 1566-1573. [冷芬, 杨在君, 吴一超, 等, 2020. 土壤pH值对何首乌生理及其光合特性和有效成分含量的影响[J]. 西北植物学报, 40(9): 1566-1573.]
LI CQ, HE LC, DONG HY, et al., 2007. Screening for the anti-inflammatory activity of fractions and compounds from *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. J Ethnopharmacol, 114(2): 212-217.
LI X, JIAN L, HAB W, et al., 2012. Antioxidant ability and mechanism of rhizoma *Atractylodes macrocephala*[J]. Macromolecules, 17(17): 13457-13472.
LI XQ, YIN GH, HAO HH, et al., 2019. Absorption and utilization of selenium in plants and selenium biofortification of main crops[J] Gansu Agric Sci Technol, (4): 65-71. [李秀启, 尹国红, 郝浩浩, 等, 2019. 植物对硒的吸收利用及主要农作物硒生物强化研究进展[J]. 甘肃农业科技, (4): 65-71.]
LIU B, CAO SJ, WANG Y, et al., 2020. Overexpression of *Lilium pumilum LpNAC6* gene enhances salt tolerance of tobacco[J]. J Beijing For Univ, 42(4): 69-79. [刘彬, 曹尚杰, 王营, 等, 2020. 过表达细叶百合 *LpNAC6* 基因增强烟草的耐盐性[J]. 北京林业大学学报, 42(4): 69-79.]
REN YH, LIU SQ, QI WL, et al., 2017. Changes of superoxide anion in mulberry leaves under drought stress[J]. Guihaia, 37(9):1122-1129. [任迎虹, 刘松青, 祁伟亮, 等, 2017. 干旱胁迫下桑树叶片中超氧阴离子的变化规律[J]. 广西植物, 37(9): 1122-1129. ]
SCHIAVON M, PILION-SMITS EAH, 2017. The fascinating facets of plant selenium accumulation-biochemistry, physiology, evolution and ecology[J]. New Phytol, 213(4): 1582-1596.

SHI HT, 2016. Experimental guidance of plant stress physiology[M]. Beijing: Science Press. [施海涛, 2016. 植物逆境生理学实验指导[M]. 北京:科学出版社.]

WANG DD, HUANG Y, ZHOU ZZ, et al., 2021. Effects of different concentrations of sodium selenate on growth and physiological indexes of tea plant[J]. Guihaia, 41(2): 183-194. [王丹丹, 黄妍, 周中政, 等, 2021. 不同浓度硒酸钠对茶树的生长和生理指标的影响[J]. 广西植物, 41(2): 183-194.]

WANG H, ZHANG YJ, DUAN YY, et al., 2019. Effects of exogenous selenium on seed germination and seedling physiological characteristics of *Atractylodes macrocephala*[J]. Mol Plant Breed, 17(22): 7551-7558. [王华, 张雅娟, 周武先, 段媛媛, 等, 2019. 外源硒对白术种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 17(22): 7551-7558. ]

WEN Z, LIU B, ZHENG Z, et al., 2010. Preparation of liposomes entrapping essential oil from *Atractylodes macrocephala* Koidz by modified RESS technique[J]. Chem Eng Res Des, 88(8): 1102-1107.

WILLIAMS P, LOMBI E, SUN GX, et al., 2009. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. Environ Sci Technol, 43(15): 6024-6030.

YANG SY, CHEN XY, HUI WK, et al., 2016. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci Ed), 45(5): 481-489. [杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 等, 2016. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 45(5): 481-489.]

ZHOU WX, HE YS, ZHU YH, et al., 2019. Improvement effects of quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer on acidified soil cultivating *Codonopsis tangshen*[J]. Appl Ecol, 30(9): 3224-3232. [周武先, 何银生, 朱盈徽, 等, 2019. 生石灰和钙镁磷肥对酸化川党参土壤的改良效果[J]. 应用生态学报, 30(9): 3224-3232.]

ZHOU WX, ZHANG MD, WANG H, et al., 2020a. Effect of organic fertilizer replacing part of chemical fertilizer combined with exogenous selenium on promoting growth of *Atractylodes macrocephala* Koidz[J/OL]. J Agric Res Environ, DOI: 10.13254/j.jare.2020.0228. [周武先, 张美德, 王华, 等, 2020a. 有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用[J/OL]. 农业资源与环境学报, DOI: 10.13254/j.jare.2020.0228.]

ZHOU WX, LIU CJ, DUAN YY, et al., 2020b. Effects of foliar selenium application on the growth of *Codonopsis tangshen* Oliv. and possible mechanisms underlying plant response to supplemental selenium[J/OL]. J Agric Res Environ, DOI: 10.13254/j.jare.2020.0382. [周武先, 刘翠君, 段媛媛, 等, 2020b. 外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制[J]. 农业资源与环境学报, DOI: 10.13254/j.jare.2020.0382.]

ZHOU WX, DUAN YY, ZHANG YJ, et al., 2021. Effects of foliar selenium application on growth and rhizospheric soil micro-ecological environment of *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. S Afr J Bot, 137: 98-109.

ZHU LX, WANG P, ZHANG WJ, et al., 2017. Effffects of selenium application on nutrient uptake and nutritional quality of *Codonopsis lanceolata*[J]. Sci Hort-Amsterdam, 225(18): 574-580.